

〔特集〕 流れを作る：風洞実験

乱流風洞

Turbulence Wind Tunnel

*豊橋技科大・工学部 蒔田 秀治†
Hideharu MAKITA

1 はじめに

乱流は流体機械の内部流，自動車や航空機周りの流れ，大気，河川，海洋などありとあらゆる流れ場に現れ，そこで決定的な役割を演じている。従って，それらの場にみられる複雑な乱流諸現象を忠実に再現し，その観察・計測を通して，乱流の果たす本質的な役割を理解する必要がある。そのために，目的に応じた様々なタイプの乱流風洞や，それらに用いる付属装置が開発されてきた。ここでは，それらのうち代表的なものについて概説する。

2 一様等方性乱流場の形成

一般的に，乱流とは Re 数の大きな流れ場に表れる不規則な流体運動であると定義される。乱流場には噴流や境界層，後流などのいくつかの基本的形態があるが，その中で最も基本的なものは一様等方性乱流場であり，現在の華麗な乱流理論の体系はその概念の上に構築されている。従って，一様等方性乱流の理論体系を論証することは極めて重要であり，風洞中に一様等方性乱流場を作り，その特性を実験的に検定することが最初に試みられた。風洞内に一様等方性乱流場を作るとは勿論できないが，それに最も近い乱流場として，いわゆる格子乱流が用いられてきた。初めて乱流格子を用いて一様等方性乱流場を形成したのは，Simons と Salter¹⁾ (1934)である。その後，現在に至るまで，乱流格子は風洞実験におけ

る乱流発生のも最も有効な手段として用いられることとなった。さらに，Dryden²⁾，Batchelor と Townsend³⁾，Comte-Bellot と Corrsin⁴⁾ らによって，主として熱線流速計を用いた格子乱流場の入念な計測が行われ，乱流エネルギーの減衰率やエネルギースペクトル，速度変動の相関など乱流場の基本特性が求められた。現在の精緻な乱流理論の体系はそれらの成果を基にして構築されたものである。図 1 に示すように，乱流格子は丸（角）棒を開口比 55~60%程度で格子状に組み合わせ

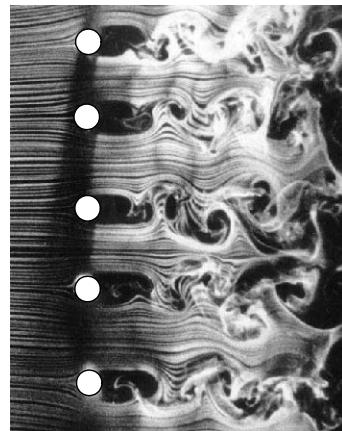
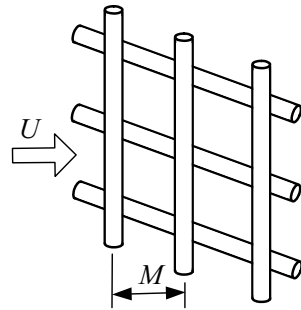


図 1 乱流格子とその下流の流れ

* 〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

† E-mail: makita@mech.tut.ac.jp

ただけの極めて簡単な構造であるにもかかわらず、その下流に良好な性質を持つ乱流場を誘起できるという特徴を持つ。しかし、このような格子乱流場では大きな乱れ強度が得られないこと、下流に向かって乱流エネルギーが減衰すること、その過程で $-5/3$ 乗則を満たすような明確な慣性小領域が存在する自己保存的なエネルギースペクトルを持ち得ないことなど、幾つかの本質的な欠点を持っている。

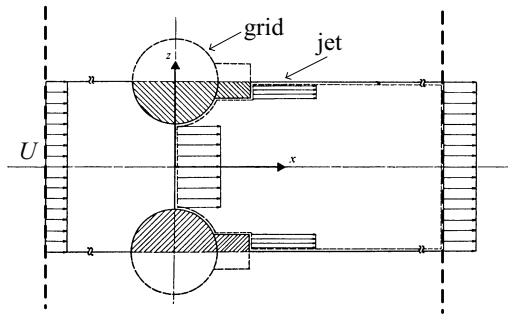
一般的に、格子乱流場の規模は格子間隔 M と流速 U に基づく格子レイノルズ数 R_M や、マイクロスケール λ_g と特性速度 $u_c = (q^2/3)^{1/2}$ (q^2 : 乱流エネルギー) に基づく乱流レイノルズ数 R_λ などで表される。例えば、大気乱流等の実験的シミュレーションに用いた場合、少なくとも $R_M \sim 10^7$ ($R_\lambda \sim 10^3$) が必要であるのに対して、通常の実験室規模の風洞を使用した格子乱流の R_λ 数はたかだか $R_M \sim 10^5$ ($R_\lambda \sim 10^2$) 程度であり、後述(図 12)するように、そのスペクトル中に乱流場の速度変動成分が最も本質的な働きをする慣性小領域を実現できないことから、通常規模の風洞中に実現した格子乱流場は必ずしも Re 数が大きいという乱流場本来の要請に答えるものとは言い難い。

Kolmogorov の普遍平衡理論や散逸構造に関して乱流場の統計的性質の再検討が求められ、そこで、大きな Re 数を有する乱流場を実験的に作り出す研究が行われてきた。例えば、Kistler と Vrebalovich⁵⁾ は大型加圧風洞中 (4 atm) に乱流格子を設置し、 $R_M = 2.4 \times 10^6$ 、 $R_\lambda = 669$ の乱流場を作り出した。その結果、スペクトル中に二桁以上の波数帯域にわたる十分に広い慣性小領域(図 12)を持つ乱流場を風洞中に実現することに初めて成功した。しかし、気流を加圧しているために散逸スケールも小さくなり、このような乱流場では、その小規模構造に関する議論をする場合、流速を検知するプローブの分解能など計測上の問題が生じる。

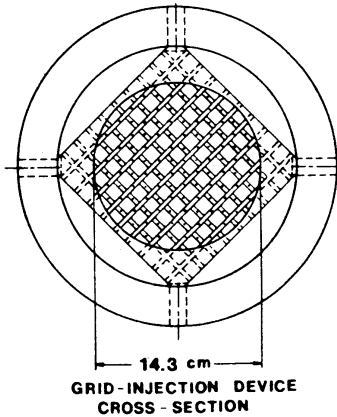
近年、各地で大型風洞が建設され、乱流場の基礎的研究にも、それらの利用が可能となってきた。

例えば、Gagne ら⁶⁾ は、格子乱流場ではないが、ONERA にある超大型風洞 S1 のリターンチャンネル (直径 24 m, 長さ 150 m, 平均流速 20 m/s) において、 $R_\lambda \sim 2720$ に達し、極めて広い慣性小領域(図 12)を持つ乱流場を形成し、その中で速度場の構造関数や確率密度分布等を求めている。Kuznetsov⁷⁾ らも超大型風洞の楕円形ノズル (長軸 24 m, 短軸 14 m) からの噴流場を熱線流速計で計測し、 $R_\lambda \sim 1660$ を得るとともに、乱流場の微細構造の解析を行っている。一方、Saddoughi ら⁸⁾ は NASA Ames Research Center の超大型風洞の測定胴天井に乱流境界層を発達させることにより、 $R_\lambda \sim 1450$ のせん断乱流場を実現し、その中で局所等方性の検証を行った。また、大型衝撃波管 (直径 30.5 cm) を用いた格子乱流場⁹⁾ ($R_\lambda \sim 700$) の実験なども行われ、格子乱流に及ぼす圧縮性 (マッハ数 0.3~0.6) の効果が調べられている。しかし、上述したような大型風洞や特殊な装置を使用して実験を行うことは、経費や使用上の可能性、あるいは、計測上の問題点等からも種々な困難を伴うことは言うまでもない。

一方で、通常の実験室規模の風洞を用い、その中に大きな乱れ強度を持つ乱流場を実現する試みもなされてきた。小型風洞内で強い乱れを持った一様準等方的な乱流場の実現に成功した例として噴流格子^{10,11)} (図 2) がある。それは、乱流格子を構成するパイプに多数の小さな孔をあけ、そこから主流中に噴流を噴出すことにより、乱流格子と噴流の相乗効果で乱流場に強い乱れを誘起する手法である。例えば、Gad-el-Hak と Corrsin¹⁰⁾ は、回流風洞の測定胴 (断面 $1 \times 1.3 \text{ m}^2$, 長さ 10 m) 上流に噴流格子を挿入し、その噴き出し条件 (上流あるいは下流に噴出) が乱流場の特性に与える効果を調べた。その結果、最大 $R_\lambda = 160$ の準等方性乱流場 ($u'/v' \sim 1.11$) が形成された。しかし、彼らによって達成された R_λ ではエネルギースペクトル中に明確な慣性小領域は存在せず、十分に大規模な乱流場が実現されているとは言えなかった。

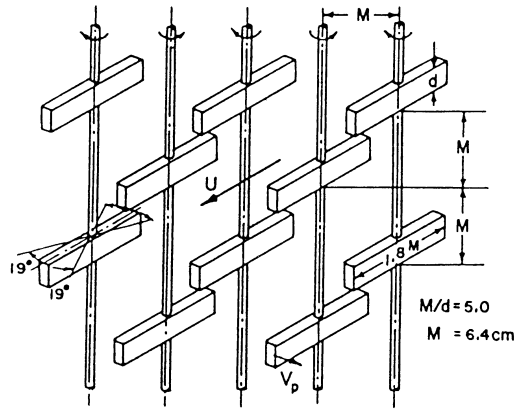


(a) Gad-el Hak & Corrsin (1974) ¹⁰⁾

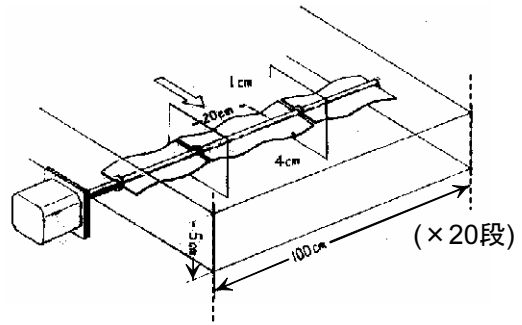


(b) Tassa & Kamotani (1975) ¹¹⁾

図2 噴流格子



(a) Ling & Wan (1972) ¹²⁾



(b) 斉藤・佐藤(1974) ¹³⁾

図3 水流・気流攪拌装置

それとは別に、動的な攪拌装置を用いて乱れを誘起することも各種提案されてきた。Ling と Wan¹²⁾ の実験は水槽中で行われたものであるが、その様な研究例の最初の一つである。彼らは、垂直に並んだ回転軸に取りつけられた長方形の攪拌板（図3(a)）を主流に対して $\pm 19^\circ$ の範囲で振動させ、開水路（測定断面 $0.6 \times 0.6 \text{ m}^2$ 、長さ11 m）中に乱流変動を誘起したが、必ずしも大きな乱流レイノルズ数（ $R_l \sim 60$ ）は得られなかった。同様の手法は風洞中でも試みられている。斎藤と佐藤¹³⁾は、図3(b)に示すような正弦波状の振動板（長さ1 m、幅5 cm）20段からなる気流攪拌装置を試作し、それを風洞の測定胴上流に設置した。本装置の特徴は各回転軸端に取り付けたsteppingモータにより振動板の駆動モードを制御可能としたことである。彼らは大気乱流と同様なスペクトル分布を有する乱流場を風洞中に

誘起することを試みた。すなわち、気流中の乱れを取り出し、そこに含まれる超低周波（1 Hz以下）のゆらぎを重ねさせた準周期的な振動を与えることによって、約9%の乱れ強度を持つ乱流場を実現した。しかし、エネルギースペクトル中には励起周波数成分が残存し、必ずしも良好な結果を得ることはできなかった。ただし、この様に流れ場を動的に制御して乱れの強い乱流場を誘起しようとする手法は、乱流レイノルズ数が大きく、一様性や等方性を有するなど、良質な大規模乱流場を通常規模の風洞中に実現し得る可能性を示したものと高く評価される。

3 せん断乱流場の形成

現在、気象や大気拡散、建物周りの流れなど環境工学分野における実験的研究が盛んに行われるようになった。この種の実験を行うため環境・

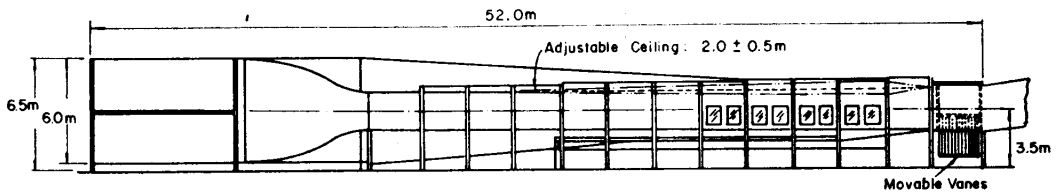


図4 気象風洞 (コロラド州立大学)¹⁴⁾

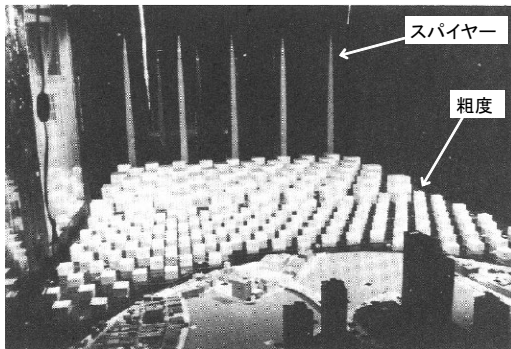


図5 風洞中に設置されたスパイヤーと粗度の一例¹⁶⁾

気象風洞と呼ばれる大型の装置が建設されている。図4に示すコロラド州立大学の大型気象風洞¹⁴⁾ (1971年)はその最初の例である。この気象風洞は、その中で接地境界層を模擬するために長大な測定胴 (長さ29m) を持ち、流れ方向の圧力勾配を調整するための可変天井 (2.0 ± 0.5 m) の採用や、温度成層流を形成するために測定胴床面の温度制御装置 (加熱・冷却) 等を備えている。以来、このような環境・気象風洞を用いて、都市の風環境や汚染物質の拡散現象等の解明を目的とした多くの実験が行われてきた。しかし、このような大型風洞を用いて大気境界層を模擬するためには、単に平均速度分布のみならず、乱流強度やレイノルズ応力等の乱流特性の分布を実際の接地境界層と相似なものにする必要がある。実際の風環境実験では、より精密な大規模せん断乱流場を実現するために、様々な装置上の工夫が凝らされている。例えば、図5にみられるように、測定胴上流にスパイヤー¹⁵⁾ と呼ばれる特殊な三角錐の突起を設置したり、種々な粗度¹⁵⁾ を測定胴床面上に敷き詰めることによってその実現が図られている。

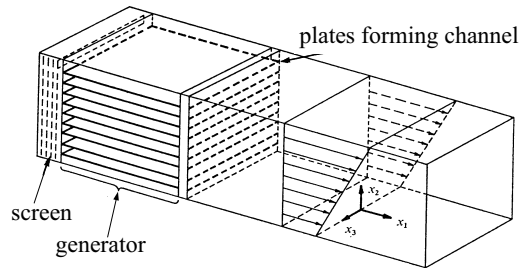


図6 速度成層装置 (Champagne et al., 1970)¹⁸⁾

上述した様な風環境問題など、せん断乱流場中で行われるシミュレーション実験でまず第一に重要なことは、主流に正確な平均速度分布を与えることである。そのためには、簡単な構造を持つ不等間隔格子¹⁷⁾ が最初に用いられた。これは水平に並んだ二次元的な格子の間隔や太さを高さ方向に不均一に変えることによって局所的な抵抗係数を変化させて平均流に速度分布を与えるものである。それを一歩進めたものに速度成層装置¹⁸⁾ (図6)がある。速度成層装置は流路を数段に分割し、それらに開口比の異なる金網や多孔板を挿入することによって各段を通る流れに異なった抵抗値を与え、その下流に任意の速度分布を形成する装置である。このような装置を用いて目的とする平均速度分布を正確に形成するためには、各段毎に様々な開口比の金網や多孔板を用意し、速度分布を何度も確認しながら、その抵抗値を繰り返し調整し直す必要がある。それを改良したものとして、(図7)に示す可変格子を用いた速度成層装置¹⁹⁾がある。それは4枚の素子を動かすことにより各段の開口比を微妙に調整することができ、種々の速度分布を容易に実現することが可能となっている。

しかし、これらの手法では平均流速分布を正確に模擬することはできても、大気乱流場の実験的

シミュレーション等を行うために要求される強い乱流強度や大きな渦スケールを伴った大規模せん断乱流場を風洞中に実現することは極めて困難である。すなわち、平均速度分布に加えて乱れ強度や渦スケール、レイノルズ応力など乱流諸量の鉛直方向分布を制御し得るものでなければならないが、実際、これらの静的な装置のみでは不可能であった。

このような問題を解決するために、流れ場に能動的な制御を加えて大規模せん断乱流場を実現し、同時にその中における乱流特性量の分布を制御しようとする試みがなされている。例えば、Nishi ら²⁰⁾ はサーボモータにより風量制御

が可能な多数のファンを用いた乱流風洞を開発した(図8)。この乱流風洞には直径0.18mのACファンを縦に11個、横に9列配置してあり、さらに、測定胴下流に21枚の振動翼列(NACA0010)が設置されている。これらのファンと振動翼の動作モードをコンピュータ制御することによって、図9に示すように、平均速度 U 、乱れ強度 I_u 、インテグラルスケール L_u 等の鉛直方向分布を風洞中に実現している。特に注目すべきは、実地観測した流速の瞬間波形(図10上段)を基に

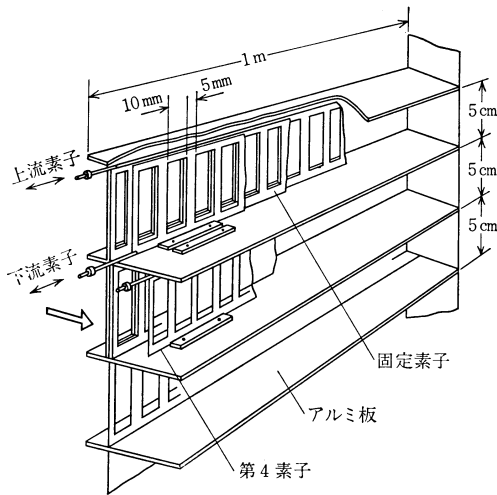


図7 可変格子を用いた速度成層装置 (佐藤・恩田, 1973¹⁹⁾)

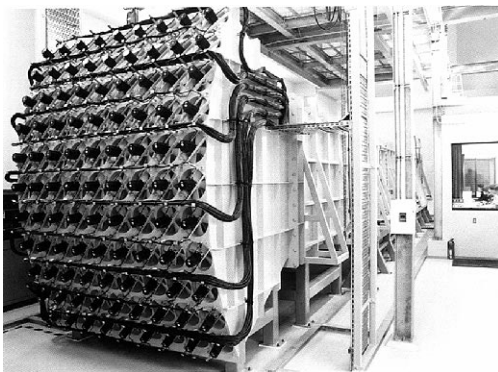


図8 多段ファンを用いた乱流風洞(宮崎大)

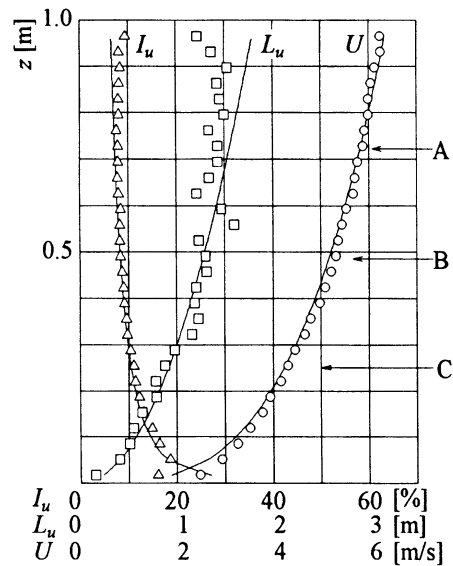


図9 乱流風洞(宮崎大)によって実現された平均速度、乱れ強度、インテグラルスケールの鉛直分布²⁰⁾

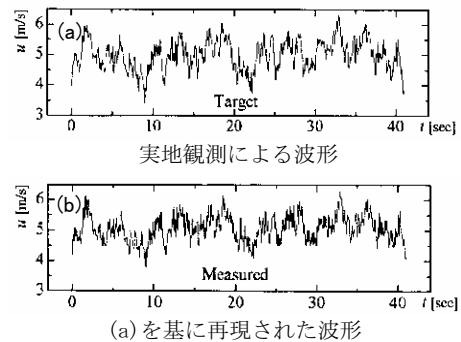


図10 乱流風洞(宮崎大)によって再現された速度変動の波形²⁰⁾

して、AC ファンと振動翼の動作をフィードバック制御することにより風洞中にそれを実現した結果（図 10 下段）であり、本風洞の性能の高さがかがえる。本風洞の構成上、高い周波数の変動（数十 Hz 以上）まで厳密に再生することは難しいが、突風の影響等、風環境に関する実験的な研究分野では高い利便性を発揮する装置であると思われる。

Makita²¹⁾ は、気流をランダムに攪拌して、スペクトルの低周波領域にエネルギーを与えることにより、実験室規模の風洞中に大きな速度変動を持つ発達した乱流場を作るという発想から、多数の攪拌翼を有する回転軸を格子状に組んだ乱流発生装置（図 11）を開発した。それは流路の

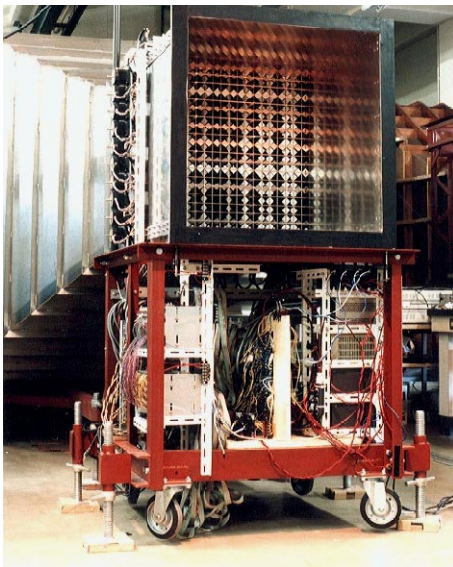
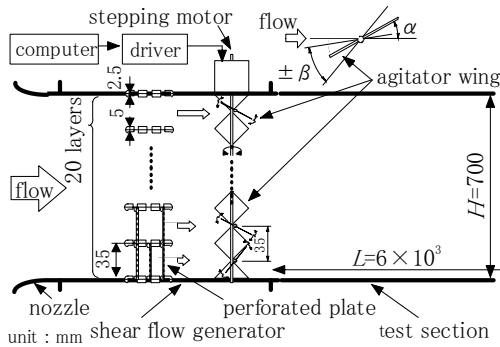


図 11 大気乱流風洞およびせん断乱流発生装置（豊橋技術科学大学）²⁵⁾

全断面積 ($0.7 \times 0.7 \text{ m}^2$) にわたって縦横各 20 本の回転軸（格子間隔 $M = 35 \text{ mm}$ ）を格子状に組み、それぞれの回転軸に取り付けた多数の小さな矩形攪拌翼を反転振動させることにより乱流場の励起を行ったものである。各回転軸端には外部のステッピングモータが直結され、それらは個別に駆動される。各回転軸の動作モードはワンボードコンピュータ、および、それらに制御条件を与えるパーソナルコンピュータにより平均迎角 α と回転範囲 β が実験目的に従って設定され、その条件下で攪拌翼をランダムに反転振動させている。本装置では回転速度や各軸の α と β を変化させることにより、一様準等方性乱流、一様せん断乱流、乱流境界層など任意の流速分布や乱流特性を有する乱流場を下流の測定胴内に形成することができる。

本装置の特色は、スペクトルの低周波側（約 20 Hz 以下）に直接ランダムな三次元的攪拌を与

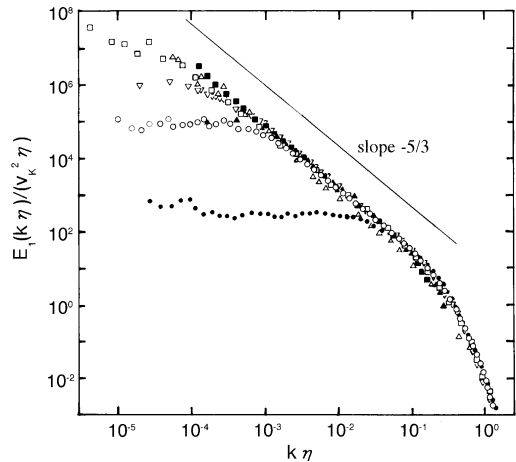


図 12 エネルギースペクトルの比較

- : 通常の乱流格子²¹⁾
 $R_M = 1.56 \times 10^4, R_\lambda = 25$
- ▲ : 大型加圧風洞 (Kistler et al⁵⁾)
 $R_M = 2.4 \times 10^6, R_\lambda = 669$
- : 動的乱流格子 (Makita²¹⁾)
 $R_M = 1.56 \times 10^4, R_\lambda = 390$
- ▽ : 超大型風洞 (Saddoughi et al⁸⁾), $R_\lambda = 1450$
- : 超大型風洞 (Gagne et al⁶⁾), $R_\lambda = 2720$
- △ : 潮流 (Grant et al²²⁾), $Re = 10^8, R_\lambda > 2000$
- : 大気乱流 (佐々ら²³⁾), $R_\lambda = 2010$

表 1 乱流特性量の比較

Experiment	U_0 [m/s]	M [mm]	X/M	R_M (10^3)	u'/U [%]	u'/v'	L_{ux} [mm]	λ_g [mm]	R_L	R_λ
Turbulence grid ⁴⁾	10	50.8	42	34.0	2.22	1.0	24	4.9	355	72
Turbulence grid ⁵⁾	61	171.0	45	2400	1.97	1.23	48	2.4	13300	669
Jet grid ¹⁰⁾	4.2	102.0	46	41.8	3.27	1.11	134	9.45	2280	160
Active grid ¹²⁾	0.003	64.0	45	0.94	4.24	1.05	59	26.7	75	34
Active grid ²¹⁾	5	46.7	50	15.6	16.4	1.22	197	8.2	9126	390
Atmospheric turbulence ²⁴⁾	4.3	-	-	-	12.0	-	-	144.0	-	4830

えたことである。これは乱流場のエネルギーカスケードを念頭において、十分に広い慣性小領域を持つ自己相似的な乱流場の実現を直接的に目指したものである。結果として、表 1 に示すように、乱れ強度 $u'/U > 35 \sim 16\%$ 、インテグラルスケール $L_{ux} = 190\text{ mm}$ に達し、 $R_\lambda = 390$ の大規模な一様準等方性乱流場が形成された (図 12)。

上述した各種装置によって形成された乱流場の特性を比較したものを表 1 に示す。Kistler と Vrebalovich⁵⁾ では、インテグラルスケール L_{ux} に基づいた乱流レイノルズ数 R_L や、 R_λ は他の乱流場よりも大きいものの、乱れ強度は $u'/U \sim 2\%$ と通常の格子乱流場と同程度であり、マイクロスケール λ_g も小さい。また、Jet grid¹⁰⁾ では、乱れ強度や L_{ux} 、 λ_g は通常の格子乱流よりは大きいものの、高レイノルズ数乱流の条件を十分に満たすものではない。Ling と Wan¹²⁾ の Active grid では通常の格子乱流場よりも 2 倍程度の乱れ強度を得ているが、水槽実験であることから、十分な乱流レイノルズ数を得られていない。Makita²¹⁾ の乱流発生装置で得られた諸特性では、 λ_g は Jet grid¹⁰⁾ や Ling と Wan¹²⁾ の Active grid よりも小さいが、大気乱流に匹敵する大きな乱れ強度を実現しており、その結果、 $R_\lambda \sim 390$ という比較的大きな値が得られている。また、エネルギーを含む渦のスケールとされる L_{ux} も十分に大きく、図 12 に示すように、エネルギースペクトル中に $-5/3$ 乗の勾配を有する慣性小領域が二桁以上にわたって明確に存在している。これは Kistler と Vrebalovich⁵⁾ の結果である $R_M > 10^6$ に匹敵する大規模な乱流場が実現されていることを示している。

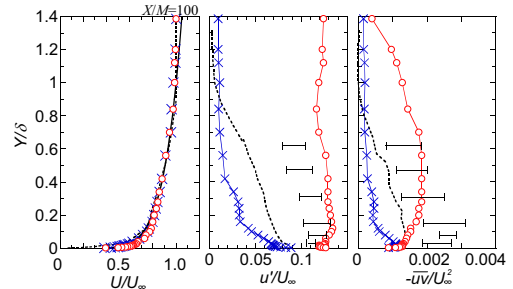


図 13 セン断乱流発生装置によって形成された平均速度、乱れ強度、レイノルズ応力の鉛直方向分布²⁵⁾
 ×: Case 1, ○: Case 2, —: $U \propto Y^{1/7}$
 —: 大気乱流²⁷⁾
: 発達した乱流境界層²⁸⁾

さらに、蒔田ら²⁵⁾ は流路を 20 段に分割した速度成層装置 (図 11) を乱流発生装置の上流に併設し、せん断乱流発生装置とした。その各段に挿入する金網や多孔板の開口比を変えることによって、一様せん断乱流場や境界層厚さ、 δ 、が大きい乱流境界層 (図 13) などをより正確に形成できる。その結果、 $\delta = 400 \sim 500\text{ mm}$ 、 $R_\lambda = 800$ に達する大規模な乱流境界層が実現されている。本乱流境界層の測定結果の一例²⁵⁾ を図 13 に示す。Case 1 は乱流発生装置を静止させ、通常の乱流格子として用い、それと速度成層装置を併用して形成した乱流場、Case 2 は攪拌翼を各段毎に異なった動作モードで駆動させて形成した乱流場である。両乱流場とも平均速度分布は平坦な地形上に発達する $1/7$ 乗則分布²⁶⁾ を与えている。両者の結果を比較すると、Case 2 では、実際の接地境界層と同様に、外層部にも大きな乱れ強度やレイノルズ応力が分布しており、壁面近傍におけるレイノルズ応力分布を除いて、エラーバーで示した

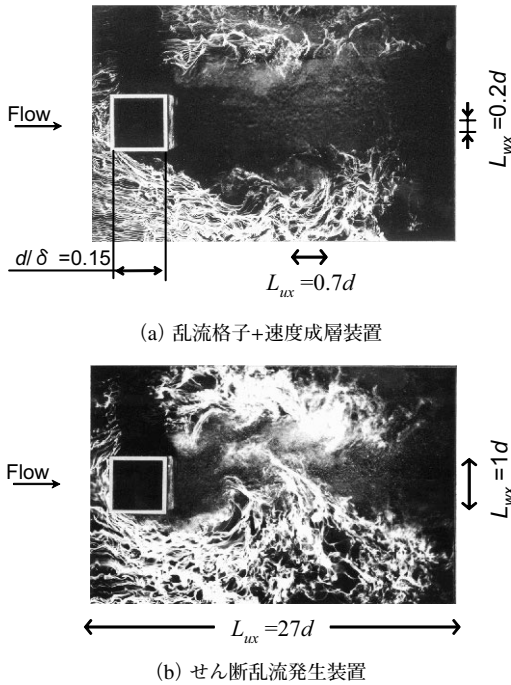


図 14 建物周りのながれ²⁵⁾

実地観測結果²⁷⁾とよく近似した分布が得られている。壁面近傍の乱流特性をより正確に合致させるためには、粗度等を併用する必要があるが、せん断乱流発生装置を用いることにより実際の接地境界層の乱流特性がほぼ正確に再現されていることがわかる。

このような乱流場に建物模型を挿入して、水平に設置 ($Y/\delta = 0.12$) したスモークワイヤーにより、周囲流の様子を観察した結果²⁵⁾を図 14 に示す。Case 1 の乱流場では、建物前面の角部で流れがはく離し、背後に明確な死水領域が形成されている。一方、Case 2 のせん断乱流場では、はく離渦が建物背後まで大きく回り込んでいる様子が観察できる。これは建物の幅 ($d = 60 \text{ mm}$) と主流中の乱流渦のスパン方向インテグラルスケール L_{wx} が同程度であり、それが建物模型から発生する渦構造と相互に干渉し、後流中の乱流構造に強い影響を与えているためである。また、本乱流場で得られる大きな拡散係数 ($C \sim 147 \text{ cm}^2/\text{s}$) を利用して、大気拡散の実験²⁹⁾なども行われているが、これらの結果は大気乱流場の諸現象、例え

ば、ビル風や煙突からの排煙の拡散等の問題を正確にシミュレーションするためには平均速度分布、乱れ強度やレイノルズ応力分布等を実際の接地境界層内の特性と一致させることに加えて、対象となる流体現象と風洞気流中の乱流渦のスケールの比まで等価的に合致させることが必要であることを示している。

また、本大規模乱流場は乱流現象の素過程等の解明にも用いられている。例えば、乱流発生装置の下流にハニカムやスリットを設置して、鉛直方向あるいは水平方向の速度変動を抑制することにより、強い異方性を有する軸対称異方性乱流場³⁰⁾や 3 次元異方性乱流場³¹⁾も形成することができる。著者らの研究室では、このような異方性乱流場の等方化プロセスの解明などを通じて Rotta のモデルや SSG モデルの検証^{30,31)}など乱流場の基礎過程に関する研究も行っている。さらに、風洞乱流における本質的欠陥の一つである乱流エネルギーの減衰が極めて小さい乱流場の実現等の研究へと、テーマを発展させている。さらに、Sassa と Makita³²⁾はこの乱流発生装置と温度成層装置を組み合わせることにより、高レイノルズ数安定成層流中の熱輸送について研究を行い、Mydlarski と Warhaft³³⁾も本装置の手法を取り入れて $R_\lambda \sim 730$ の乱流場を実現し、パッシブスカラーの統計的性質を解析している。現在、これまでに述べた様な実験的研究を通して、種々の大規模乱流場の構造が詳細に解明されつつある。

4 おわりに

現在、理論的研究や CFD の発達によって得られた成果を検証するために、理想的な乱流場中で乱流の基礎構造をより厳密に計測することが望まれている。風洞実験によって与えられるものは、常に実在する流体現象である。しかし、我々実験者が風洞実験で直接観察し得るものは、あくまでも複数の流体力学的現象が複合されたものであり、常にあいまいさを伴う。さらに、そこから抽出する個々の計測結果には、誤差も含まれる。風洞実験を試みるとき、まず第一に重要なことは

「良質な流れ場を得ること」である。そのためには、今後も風洞やその付属装置に一層の改良に加える必要がある。さらに、計測や可視化の手法、データ処理の手段等に多くの工夫を加え、乱流場を記述するのに必要な高次の相関量や統計量についても信頼性の高い実験データを得て、そこから有意義な情報を正確に抽出しなければならない。その上に立って、理論的研究や数値実験の結果と互いに検証し合いながら、複雑な流体现象の真の姿に少しでも接近することが風洞実験の永遠のテーマであることは言うまでもない。

引用文献

- 1) Simons, L. F. & Salter, C. : Experimental investigation and analysis of the velocity variations, Proc. Roy. Soc. Ser. A **415** (1934) 212.
- 2) Dryden, H. L. : Isotropic turbulence in theory and experiment, T. von Karman Anniv. (1941) 85.
- 3) Batchelor, G. K. & Townsend, A. A. : Decay of isotropic turbulence in the initial period, Proc. Roy. Soc. A **193** (1948) 539.
- 4) Comte-Bellot, G. & Corrsin, S. : The use of a contraction to improve the isotropy of grid-generated turbulence, J. Fluid Mech. **25** (1963) 657.
- 5) Kistler, A. L. & Vrevalovich, T. : Grid turbulence at large Reynolds numbers, J. Fluid Mech. **26** (1966) 37.
- 6) Gagne, Y., Hopfinger, E. J. & Frish, U. : A New Universal Scaling for Fully Developed Turbulence, NATO ASI **237** (1990) 315.
- 7) Kuznetsov, V. R., Praskovsky, A. A. & Sabelnikov, V. A. : Fine-Scale Turbulence Structure of Intermittent Shear Flows, J. Fluid Mech. **243** (1992) 595.
- 8) Saddoughi, S. G. & Veeravalli, S. V. : Local Isotropy in Turbulence Boundary Layers at High Reynolds Number, J. Fluid Mech. **268** (1994) 333.
- 9) Briassulis, G., Agui, J. H. & Andreopoulos, Y. : The structure of weakly compressible grid-generated turbulence, J. Fluid Mech. **432** (2001) 219.
- 10) Gad-el-Hak, M. & Corrsin, S. : Measurements of the nearly isotropic turbulence behind a uniform jet grid, J. Fluid Mech. **62** (1974) 115-143.
- 11) Tassa, Y. & Kamotani, Y. : Experiments on turbulence behind a grid with jet injection in downstream and upstream direction, Phys. of Fluids **18** (1975) 411.
- 12) Ling, S. C. & Wan, C. A. : Decay of isotropic turbulence generated by mechanically agitated grid, Phys. of Fluids **15** (1972) 1363.
- 13) 齊藤・佐藤 : 大気の流れを風洞の中にする一方法, 乱流シンポジウム講演論文集(1974) 103.
- 14) Cermak, J. E. : Laboratory simulation of the atmospheric boundary layer, AIAA J. **9** (1971) 1746.
- 15) Rae, W. H. & Pope, A. : *Low-speed wind tunnel Testing* (John Wiley & Sons., 1984) 486.
- 16) 村上 : 高層建築物による風害の予測・対策と風洞実験手法について, 東京大学生産技術研究所(1983) 77.
- 17) Rose, W.G. : Results of an attempt to generate a homogeneous turbulent shear flow, J. Fluid Mech. **25** (1966) 97.
- 18) Champagne, F. H., Harris, V. G. & Corrsin, S. : Experiments on nearly homogeneous turbulent shear flow, J. Fluid Mech. **41** (1970) 81-139.
- 19) 佐藤・恩田・齊藤 : 東京大学宇宙航空研究所報告 **9** (1973) 675.
- 20) Nishi, A., Kikugawa, H., Matsuda, Y. & Tashiro, D. : Turbulence control in multiple-fun wind tunnels, J. Wind Engi and Industrial Aero **67** (1997) 861.
- 21) Makita, H. : Realization of a large-scale turbulence field in a small wind tunnel, Fluid Dyna. Res. **8** (1991) 53.
- 22) Grant, H.L., Stewart, R.W. & Moilliet, A. : Turbulence spectra from a tidal channel, J. Fluid Mech. **12** (1962) 241.
- 23) 佐々・千葉・蒔田 : 接地境界層中の乱流微細構造

- に及ぼす安定度の影響, 日本流体力学会第 27 回乱流シンポジウム講演論文集 (1995) 203.
- 24) Sheih, C.M., Tennekes, H. & Lumley, J.L. : Airborne hot-wire measurements of the small-scale structure of atmospheric turbulence, *Phys. of Fluids* **14** (1971) 201.
- 25) 関下・蒔田・一郷・藤田 : 大気乱流境界層の実験的シミュレーション, *機論 B* **68-665** (2002) 55.
- 26) Davenport, A.G. : *Proc. ASCE* 86, Spr **5** (1969) 39.
- 27) Hanafusa, T. & Fujitani, T. : *Meteorology and Geophysics* **32** (1981) 19.
- 28) Klebanoff, P.S. : *NACA TN* 3178 (1954).
- 29) 蒔田・佐々・飯田・茂山 : 大気乱流拡散の実験的シミュレーション, *機論* **522-B** (1990) 388.
- 30) 蒔田・岩崎・飯田 : 軸対称異方性乱流場の実験的解析, *B54-505* (1988) 408.
- 31) 蒔田・南 : 三次元異方性乱流場の減衰過程に関する実験的研究, *B61-581* (1995) 26.
- 32) Sassa, K. & Makita, H. : Heat transfer in stable stratified and high Re turbulence, *Internal workshop on physical modeling of flow and dispersion phenomena* (2001).
- 33) Mydlarski, L. & Warhaft, Z. : Passive scalar statistics in high-Peclet-number grid turbulence, *J. Fluid Mech.* **358** (1998) 135.